

DESENVOLVIMENTO DE AÇO BAIXO CARBONO EM ACIARIA ELÉTRICA PARA PRODUÇÃO DE ARAMES GALVANIZADOS*

Anderson Nicolodi¹

Ricardo Ilha²

Sabrina Karnopp Forte³

Wagner Viana Bielefeldt⁴

Antônio Cezar Faria Vilela⁵

Resumo

O objetivo deste estudo foi viabilizar a produção de um aço baixo carbono em aciaria elétrica para fabricação de arames galvanizados. Foram produzidos seis aços baseados no aço SAE 1005: um aço em aciaria a oxigênio de usina integrada, um aço em aciaria a oxigênio de usina integrada com adição de boro, um aço em aciaria elétrica e três aços com diferentes níveis de adição de boro em aciaria elétrica. Estes aços foram empregados na produção de arames galvanizados BWG 12. A caracterização dos aços e arames galvanizados visou determinar composição química, resistência mecânica (ensaio de tração) e comportamento frente ao envelhecimento estático. Os resultados obtidos indicam que a adição de boro na produção de aço em aciaria elétrica permite reduzir consideravelmente o limite de resistência a tração e aumentar o alongamento de arames galvanizados, tornando-os similares aos produzidos em usinas integradas. Estas observações são maximizadas para o aço com teor de boro intermediário estudado. Nas condições em que o estudo foi realizado, observou-se que a produção de um aço baixo carbono em aciaria elétrica para fabricação de arames galvanizados pode ser realizada com adições adequadas de boro na composição dos aços.

Palavras-chave: Aço baixo carbono; Boro; Arame galvanizado; Aciaria elétrica.

DEVELOPMENT OF LOW CARBON STEEL IN AN ELECTRIC STEEL SHOP FOR GALVANIZED WIRE PRODUCTION

Abstract

This study aimed to make feasible the production of a low carbon steel in an electric steel shop for galvanized wire manufacturing. Six steels were produced based on the SAE 1005 standard: one steel produced at an integrated steel mill equipped with a basic oxygen furnace, one steel with boron addition produced at an integrated steel mill equipped with a basic oxygen furnace, one steel produced at an electrical steel shop, and three steels with different levels of boron addition produced at an electrical steel shop. These steels were used for production of galvanized wires BWG 12. The characterization of the steels and galvanized wires aimed to determine chemical composition, mechanical strength (tensile test) and strain ageing behavior. The results obtained indicate that the addition of boron in the production of steel in an electric melt shop considerably reduces the ultimate tensile strength and increases the elongation of galvanized wires, making them similar to those produced in integrated steel mills. These observations are even clearer for the steel with intermediate boron content. Under the conditions in which this study was carried out, it was observed that the production of low carbon steel in an electric steel shop for the manufacture of galvanized wires could be carried out with appropriate additions of boron in the steel composition.

Keywords: Low carbon steel; Boron; Galvanized wire; Electric steel shop.

- ¹ *Engenheiro metalúrgico, mestrando no PPGe3M da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*
- ² *Engenheiro mecânico, especialista de qualidade, tecnologia de processos e produtos, Gerdau Riograndense, Sapucaia, RS, Brasil.*
- ³ *Engenheira de materiais, especialista de qualidade, tecnologia de processos e produtos, Gerdau Riograndense, Sapucaia, RS, Brasil.*
- ⁴ *Prof Dr., professor no DEMET/PPGe3M e coordenador da área de aciaria do Laboratório de Siderurgia da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*
- ⁵ *Prof. Dr. Ing., DEMET/PPGe3M/ e coordenador geral do Laboratório de Siderurgia da UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Buscar custos competitivos na indústria siderúrgica é um desafio constante, e uma questão de sobrevivência do negócio. Desta forma, as empresas siderúrgicas estão procurando, cada vez mais, atingir os melhores padrões de qualidade de seus produtos, aliados ao menor custo de produção e à alta produtividade.

Nas trefilarias de aços de usinas semi-integradas, em particular, uma forma de reduzir os custos do processo é de viabilizar a produção do aço a ser trefilado na própria usina. Deste modo, não há custos com a compra e o transporte de aço de outras usinas.

Frequentemente, em usinas semi-integradas com aciaria elétrica, a produção regular de um aço tipo SAE 1005, utilizado na produção de arames galvanizados, possui algumas limitações. Estas limitações decorrem das diferenças nos processos que influenciam nas propriedades mecânicas dos aços produzidos. Em usinas integradas o aço é produzido em uma aciaria à oxigênio a partir do ferro-gusa obtido em um alto-forno na área de redução, enquanto na usina semi-integrada o aço é produzido em uma aciaria elétrica, o que implica em algumas diferenças nos aços:

- Os eletrodos usados para fusão da carga em processos de aciaria elétrica tendem a ionizar o nitrogênio do ar, dissolvendo este elemento no aço. A faixa de nitrogênio no produto final em aciarias a oxigênio apresenta entre 10 e 40 ppm de nitrogênio, já em aciarias elétricas, o produto final pode conter um teor entre 40 e 110 ppm[1].
- Em função da carga ser principalmente sucata ferrosa em aciarias elétricas, os teores de elementos químicos residuais como Cu, Cr, Ni, Mo, Sn, Nb, V, Sb e As são tipicamente maiores neste processo [2].

O alto teor de nitrogênio e de residuais influenciam as propriedades mecânicas dos aços produzidos em aciarias elétricas. O nitrogênio pode atuar de diversas formas para aumentar a resistência mecânica do aço, como solução sólida intersticial (comportamento similar ao C), formação de nitretos (podem ser refinadores de grão) e envelhecimento. O nitrogênio em solução sólida intersticial possui forte poder endurecedor na ferrita, além de aumentar a temperatura de transição de regime frágil/dúctil [3]. Enquanto os elementos residuais trazem efeitos diversos nas propriedades do aço, porém, de maneira geral, todos contribuem no endurecimento do aço por solução sólida substitucional. Maiores informações a respeito da influência dos elementos residuais no aço podem ser encontradas nos trabalhos aqui citados [2,4,5].

Estas características expostas dificultam a produção de arames galvanizados a partir de aços de baixo carbono de aciarias elétricas, pois frequentemente as propriedades mecânicas destes arames são maiores do que os limites especificados em normas técnicas.

Uma alternativa para viabilizar a produção destes aços em aciaria elétrica é a utilização do boro em baixas concentrações. O boro no aço forma nitretos e/ou carbonitretos, os quais apresentam algumas vantagens. O primeiro ponto é que os precipitados de boro não endurecem o aço, isto ocorre devido aos seus precipitados serem esféricos e de pequenas dimensões (200 nm) [6]. Além disso, ao formar nitretos e carbonitretos, o boro reduz a quantidade de nitrogênio e carbono em solução sólida, o que reduz o efeito de aumento na resistência mecânica por solução sólida intersticial destes elementos, além de reduzir o efeito do envelhecimento por

diminuir a formação de atmosferas de Cotrell [7]. Por fim, diferentemente dos nitretos de alumínio, vanádio e titânio, os nitretos de boro não são refinadores de grão. O objetivo deste estudo foi viabilizar a produção de um aço baixo carbono em aciaria elétrica para produção de arames galvanizados. Para este fim, aços ligados ao boro foram produzidos e caracterizados, comparando com as propriedades de aços produzidos em aciaria elétrica e em aciarias a oxigênio de usinas integradas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O arame galvanizado BWG 12 foi escolhido como referência para a realização deste estudo, suas especificações são apresentadas na Tabela 1. A escolha desta bitola se deve ao grande emprego deste material na indústria de conformação e a dificuldade de atingir sua especificação mecânica em aciarias elétricas.

Tabela 1. Faixa de tolerância dimensional e limite de resistência a tração do arame BWG 12.

	Diâmetro (mm)			σ_r
	Nominal	Mín.	Máx.	Máx.
BWG 12	2,77	2,74	2,82	55 kgf/mm ²

σ_r – Limite de resistência a tração.

Em usinas semi-integradas, é comum o uso de especificações internas mais conservadoras, que limitam o limite de resistência a tração do BWG 12 em 50 kgf/mm². Esta limitação é realizada principalmente para compensar o aumento do limite de resistência a tração em função do envelhecimento, mas também para minimizar o não atendimento da norma por variabilidade do processo.

2.1 Produção dos aços estudados

Para a realização do estudo foram produzidos 6 aços baseados no aço SAE 1005, cuja especificação em termos de composição química é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Especificação química do aço SAE 1005, valores em massa.

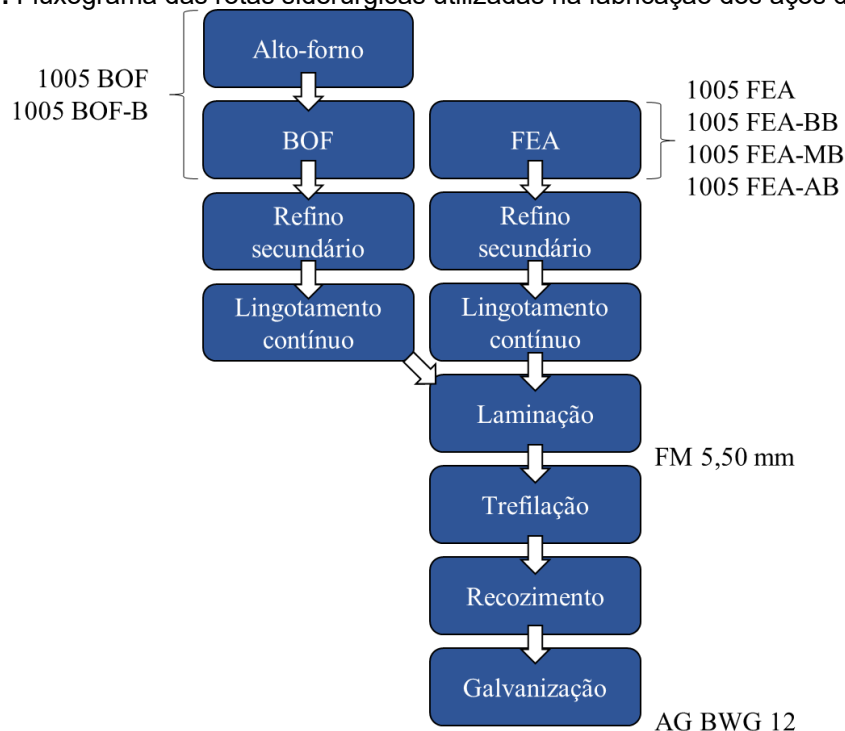
Aço	C (%)	Mn (%)	S (%)	P (%)
SAE 1005	< 0,06	<0,35	< 0,05	< 0,04

As amostras consistem em um aço de referência produzido em uma siderúrgica integrada com processo de aciaria a oxigênio (1005 BOF), um aço de referência produzido em uma siderúrgica integrada com adição de boro (1005 BOF-B), um aço produzido em uma aciaria elétrica baseado na norma SAE 1005 (1005 FEA) e três aços baseados no aço SAE 1005 produzidos em aciaria elétrica com diferentes níveis de adição de boro, baixo boro (1005 FEA-BB), médio boro (1005 FEA-MB) e alto boro (1005 FEA-AB). Os aços do estudo são sumarizados na Tabela 3, onde também é apresentado uma breve descrição destes aços.

Tabela 3. Nomenclatura e descrição dos aços utilizados neste estudo.

Aço	Descrição
1005 BOF	Aço de referência, baseado na norma SAE 1005 produzido em uma siderúrgica integrada.
1005 BOF-B	Aço de referência, baseado na norma SAE 1005 produzido em uma siderúrgica integrada com adição de boro.
1005 FEA	Aço baseado na norma SAE 1005 produzido em uma aciaria elétrica equipada com forno elétrico a arco (FEA).
1005 FEA-BB	Aço baseado na norma SAE 1005 com pequenas adições de boro ($\cong 25$ ppm) produzido em uma aciaria elétrica.
1005 FEA-MB	Aço baseado na norma SAE 1005 com médias adições de boro ($\cong 50$ ppm) produzido em uma aciaria elétrica.
1005 FEA-AB	Aço baseado na norma SAE 1005 produzido com altas adições de boro ($\cong 75$ ppm) em uma aciaria elétrica.

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma das rotas siderúrgicas utilizadas nos processos de fabricação dos aços do estudo. Os aços de usina integrada iniciaram seus processamentos na rota alto-forno/BOF, enquanto os demais aços de aciaria elétrica foram produzidos em uma usina siderúrgica semi-integrada equipada com um FEA. Conforme o fluxograma, os tarugos do aço 1005 BOF e 1005 BOF-B foram recebidos na usina semi-integrada para serem laminados, trefilados, recozidos e galvanizados.

Figura 1. Fluxograma das rotas siderúrgicas utilizadas na fabricação dos aços do estudo.

FEA – Forno elétrico a arco; BOF – *Basic Oxygen Furnace*; FM – Fio máquina; AG – Arame galvanizado.

As amostras utilizadas nas caracterizações químicas e mecânicas foram obtidas a partir dos fios máquinas (FM) e arames galvanizados (AG) dos aços.

2.2 Caracterização dos aços

Caracterização química

A análise da composição química dos aços foi realizada em um espectrômetro de emissão ótica. Para esta análise, foram realizadas 3 mensurações da composição química de cada amostra, considerando a média delas como a composição química do material. A caracterização química foi realizada em amostras retiradas do FM de 5.50 mm.

Caracterização mecânica

As resistências mecânicas dos aços foram avaliadas através do ensaio de tração. O ensaio de tração em temperatura ambiente foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 6892 (2018). Para realizar este teste, 5 amostras de arames galvanizados com comprimento de 500 mm foram utilizadas para cada aço. O principal objetivo do ensaio foi determinar o limite de resistência a tração (σ_r) dos aços para verificar aqueles que atendem a especificação de produção do arame galvanizado BWG 12. Além disso, a tensão de escoamento (σ_e) e o alongamento máximo (AL) também foram determinados.

Avaliação do envelhecimento

Para avaliar o efeito do envelhecimento estático nos AG produzidos, amostras foram coletadas dos AG de cada aço apresentado na Tabela 2. As amostras foram submetidas a ensaios de tração no dia em que os aços foram produzidos e após cada semana durante um período de 28 dias. O aumento no σ_r dos AG ($\Delta\sigma_r$) devido ao envelhecimento foi calculado pela simples diferença entre o σ_r da amostra envelhecida e não envelhecida ($\Delta\sigma_r$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta os resultados das análises de composição química dos aços obtidas em um espectrômetro de emissão ótica.

Tabela 4. Composição química dos aços estudados, valores em massa.

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	S (%)	P (%)	N (ppm)	B (ppm)	B/N	Residuais (%)
1005 BOF	0,027	0,495	0,170	0,013	0,029	44	-	-	0,056
1005 BOF-B	0,040	0,273	0,181	0,005	0,012	29	31	1,07	0,030
1005 FEA	0,051	0,396	0,142	0,018	0,016	74	-	-	0,319
1005 FEA-BB	0,051	0,352	0,159	0,015	0,008	83	20	0,24	0,281
1005 FEA-MB	0,053	0,359	0,150	0,014	0,009	74	47	0,63	0,290
1005 FEA-AB	0,043	0,380	0,128	0,018	0,012	72	70	0,97	0,281

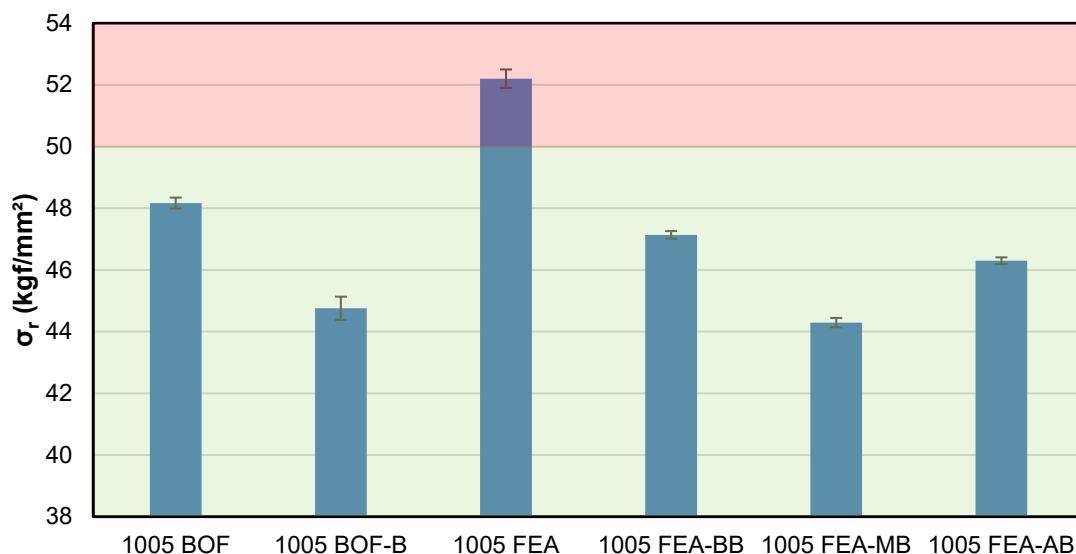
Residuais – soma dos elementos Cu, Cr, Ni, Mo, Sn, Nb, V, Sb e As.

Nota-se na Tabela 4 que as composições químicas de todos os aços atendem a especificação do aço SAE 1005 apresentada na Tabela 2, exceto pelo teor de Mn que ficou ligeiramente acima para algumas composições. Na elaboração dos aços buscou-se minimizar a variação dos teores de carbono, manganês, silício e fósforo,

de modo a minimizar a influência destes elementos nas diferenças de propriedades mecânicas observadas entre os aços. No entanto, os aços fornecidos pelas usinas integradas apresentaram uma maior variabilidade, como o baixo teor de carbono e elevado de manganês do aço 1005 BOF. O teor de nitrogênio e de residuais dos aços 1005 BOF e 1005 BOF-B são consideravelmente menores que os demais aços produzidos em FEA, o que se deve às características dos processos e às matérias-primas utilizadas. Esta diferença tem um importante impacto na resistência mecânica, conforme será discutido posteriormente. Por fim, a relação B/N também é importante, pois relações entre 0,7 – 0,8 são apontadas como ideais para máxima precipitação de nitretos de boro (BN) [8]. Assim, o aço 1005 FEA-MB apresenta uma relação B/N próxima do ideal, enquanto o aço 1005 FEA-BB não possui boro suficiente para precipitar todo o nitrogênio em nitretos de boro e o aço 1005 FEA-AB, por sua vez, possui boro em excesso.

A Figura 2 apresenta a média e desvio padrão do σ_r dos arames galvanizados produzidos com os aços estudados. Na figura é apresentado em verde a região que atende a especificação interna de produção do BWG 12 e em vermelho a região que não atende.

Figura 2. Média e desvio padrão dos limites de resistência a tração dos arames galvanizados estudados.



Região verde – delimita a região que atende a especificação interna de produção do arame galvanizado BWG 12;

Região vermelha – delimita a região que não atende a especificação interna de produção do arame galvanizado BWG 12.

O aço 1005 FEA é o único que não atende a especificação interna de produção do BWG 12, sua elevada resistência mecânica comparada ao aço 1005 BOF se deve principalmente pelo maior teor de elementos residuais e nitrogênio livre. Os elementos residuais são responsáveis pelo aumento da resistência mecânica por solução sólida [2], já o nitrogênio livre é endurecedor da ferrita por solução sólida intersticial [3].

Com a adição de boro foi possível reduzir o Lr em níveis próximos aos dos aços 1005 BOF e 1005 BOF-B. A adição de boro fixa o nitrogênio livre em nitretos BN, o que reduz o efeito de endurecimento por solução sólida intersticial deste elemento

[7]. Além disso, os precipitados de nitreto de boro não endurecem significativamente o aço, pois seus precipitados são tipicamente esféricos e de pequenas dimensões [7]. Por fim, diferentemente dos nitretos de alumínio, vanádio e titânio, os nitretos de boro não são refinadores de grão do aço [6]. Possivelmente existe uma maior formação de nitretos com aumento do teor de boro do aço 1005 FEA-BB para o 1005 FEA-MB, o que impacta na maior redução do Lr. No entanto, o Lr aumenta para o aço 1005 FEA-AB que possui boro em excesso, i.e., relação B/N maior que 0,7-0,8. Este fenômeno pode estar associado a precipitação de boretos de ferro (Fe_2B), que ocorre apenas em aços saturados em boro e que tem efeito endurecedor do aço [9]. O teor de boro adicionado nos aços deve ser controlado, pois elevados teores de Fe_2B podem fragilizar o aço [9].

Além do σ_r , na Tabela 5 é apresentado a σ_e e o AL dos aços estudados.

Tabela 5. Propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração dos arames galvanizados estudados.

	σ_e (kgf/mm ²)	σ_r (kgf/mm ²)	AL (%)
1005 BOF	39,7 ± 0,1	48,2 ± 0,2	26,6 ± 0,8
1005 BOF-B	35,6 ± 0,5	44,8 ± 0,4	30,8 ± 0,9
1005 FEA	41,8 ± 0,4	52,2 ± 0,3	23,0 ± 0,9
1005 FEA-BB	37,7 ± 0,3	47,1 ± 0,1	28,6 ± 1,3
1005 FEA-MB	36,0 ± 0,3	44,3 ± 0,2	28,2 ± 0,7
1005 FEA-AB	36,6 ± 0,2	46,3 ± 0,1	30,7 ± 0,6

σ_e – Tensão de escoamento; σ_r – Limite de resistência a tração; AL – Alongamento máximo.

De maneira geral, a tendência do comportamento da σ_e segue a do σ_r : a maior para o aço 1005 FEA, a menor para o aço 1005 BOF-B e valores intermediários para os aços de aciaria elétrica ligados ao boro, com um mínimo para o aço 1005 FEA-MB. A presença do boro aparenta aumentar consideravelmente a ductilidade do aço, visto que o AL destes aços é bastante similar ao AL do aço 1005 BOF-B e maior que a do aço 1005 BOF.

A seguir são apresentados os resultados obtidos na avaliação do envelhecimento estático por deformação. A Figura 3 trata da evolução do σ_r dos arames galvanizados estudados com relação ao tempo de envelhecimento em dias. Já a Tabela 6 apresenta os $\Delta\sigma_r$ dos arames com o tempo de envelhecimento.

Figura 3. Evolução do limite de resistência a tração dos arames galvanizados estudados devido ao tempo de envelhecimento.

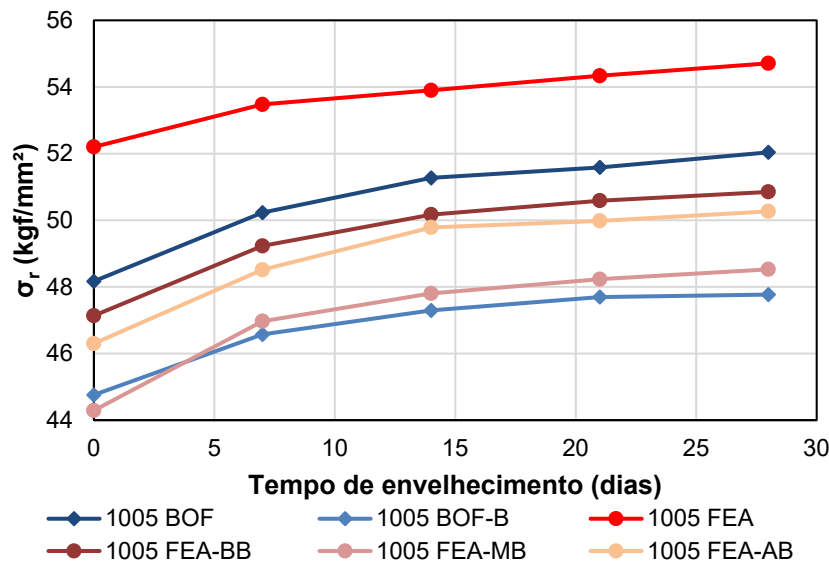


Tabela 5. Aumento no limite de resistência a tração dos arames galvanizados estudados em relação ao tempo de envelhecimento.

Tempo (dias)	$\Delta\sigma_r$ (kgf/mm ²)					
	1005 BOF	1005 BOF-B	1005 FEA	1005 FEA-BB	1005 FEA-MB	1005 FEA-AB
7	2,1	1,8	1,3	2,1	2,7	2,2
14	3,1	2,5	1,7	3,0	3,5	3,5
21	3,4	2,9	2,1	3,5	3,9	3,7
28	3,9	3,0	2,5	3,7	4,2	4,0

$\Delta\sigma_r$ – Aumento do limite de resistência a tração em relação ao dia 0.

Observa-se na Figura 3 o comportamento similar do AG BWG 12 produzido com o aço 1005 FEA-MB e com o 1005 BOF-B, apresentando o grande potencial do uso do boro na produção deste tipo de produto em aciarias elétricas. Além disso, todos os AG produzidos com aços ligados ao boro em aciaria elétrica apresentaram σ_r inferior ao AG do aço 1005 BOF durante todo o período de envelhecimento estudado. Com base na literatura, a adição de boro deveria reduzir os efeitos de envelhecimento por fixar o nitrogênio em nitretos e não permitir a difusão deste elemento para discordâncias. No entanto, destaca-se na Tabela 5 que o aço 1005 FEA apresentou um comportamento de envelhecimento menos acentuado que os demais, mesmo possuindo maior teor de nitrogênio livre. Possivelmente, a elevada mobilidade do nitrogênio no aço 1005 FEA faz com que no dia 0 parte do nitrogênio já tenha se fixado em discordâncias, o que ajuda a explicar a elevada σ_r inicial e o comportamento de menor $\Delta\sigma_r$ com o avanço do tempo de envelhecimento.

Ainda, as evoluções da σ_r dos aços 1005 FEA-BB e 1005 FEA-AB indicam que estes aços não atendem a especificação interna depois de um período de envelhecimento de 14 e 21 dias, respectivamente. O que reforça a importância de uma adição controlada de boro visando uma faixa estreita de composição.

4 CONCLUSÕES

Este estudo buscou viabilizar a produção de um aço baixo carbono em aciaria elétrica para produção de arames galvanizados. Verificou-se que a utilização do boro como elemento de liga na produção de aços em aciarias elétricas apresenta grande potencial para este fim. Foi possível verificar neste estudo, apoiado com dados da literatura, as seguintes observações:

- A adição de boro na produção do aço permite reduzir consideravelmente os níveis de resistência mecânica de arames galvanizados. O aço 1005 FEA-MB apresentou maior redução do limite de resistência a tração. Este aço apresenta relação boro/nitrogênio de 0,63, que é o mais próximo da relação entre 0,7-0,8 apontada como ótima para precipitação de nitretos de boro na literatura.
- Os aços ligados ao boro apresentaram maior aumento no limite de resistência a tração com o envelhecimento. No entanto, mesmo após longos períodos de envelhecimento, os limites de resistência a tração dos aços ligados ao boro são significativamente menores do que o observado no aço 1005 FEA.
- Além da redução do limite de resistência com a adição de boro, houve um aumento significativo no alongamento máximo destes aços, os quais ficaram maiores que o do aço 1005 BOF e bastante próximos ao do aço 1005 BOF-B.

Agradecimentos

REFERÊNCIAS

- 1 IISI. Committee on Technology Working Group on FEA Technology: FEA Technology State of the Art & Trends. 2000.
- 2 Bell S, Davis B, Javaid A, Essadiqi E. Final Report on Effect of Impurities in Steel. Enhanced Recycling - Action Plan 2000 on Climate Change [Internet]. 2006 [citado 30 de janeiro de 2020]; Recuperado de: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.33946.85440>
- 3 Krauss G. Steels: processing, structure, and performance. Materials Park, Ohio: ASM International; 2005.
- 4 Parker ER, Halley JW, Rhines F N, Scaff J H, McPherson D J. Effect of Residual Elements on The Properties of Metals. ASM. 1957;71–87.
- 5 Stephenson ET. Effect of recycling on residuals, processing, and properties of carbon and low-alloy steels. MTA. 1983;14:343–53.
- 6 Mehta S. Strain Ageing of Low Carbon Steel Wire Rods [Tese em ciência dos materiais]. University of New South Wales; 2003.
- 7 Nesterenko A, Sychkov A, Plyuta V, Blokhin M. Strain Aging in Boron Alloyed Multi-Phase C- Mn – Si – Steel Wire Rod. JMSR. 2018;7:78.
- 8 Messien P, Leroy V. Scavenging additions of boron in low C - low Al steels. Steel Research. 1989;60:320–8.
- 9 Wang Z-J, Li Y-W, Wang G-D, Liu H-T. Effects of boron content on the microstructure and mechanical properties of twin-roll strip casting borated steel sheets. Materials Science and Engineering: A. 2020;793:139847.]